

В. И. ПОЛЯНСКИЙ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Предложен новый теоретический подход к раздельному определению составляющих силы резания при точении, обусловленных процессами собственно резания и трения на передней и задней поверхностях режущего инструмента в общей энергоемкости механической обработки, с использованием экспериментальных данных о тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и условном угле сдвига обрабатываемого материала. Это позволило привести в соответствие теорию и практику процесса резания, уточнить теоретические решения, полученные с использованием формулы профессора Зворыкина К. А. для определения условного угла сдвига обрабатываемого материала, и на этой основе установить условия уменьшения энергоемкости и силы резания. Показано, что при точении резцами из гексанита-Р детали из стали 45 энергоемкость "чистого" резания значительно превышает предел прочности на сжатие обрабатываемой стали. Это указывает на существование резервов снижения интенсивности трения в зоне резания, а, соответственно, параметров силовой напряженности резания.

Ключевые слова: точение, сила резания, режущий инструмент, плоскость сдвига, трение, прочность.

В. І. ПОЛЯНСЬКИЙ

ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Запропоновано новий теоретичний підхід до роздільного визначення складових сили різання при точінні, обумовлених процесами "чистого" різання й тертя на передній і задній поверхнях різального інструменту в загальній енергоємності механічної обробки, з використанням експериментальних даних тангенціальної та радіальної складових сили різання й умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу. Це дозволило привести у відповідність теорію і практику процесу різання, уточнити теоретичні рішення, отримані з використанням формули професора Зворикіна К. А. для визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу, і на цій основі встановити умови зменшення енергоємності та сили різання. Показано, що при точінні різцями з гексаніта-Р деталі зі сталі 45 енергоємність "чистого" різання значно перевищує межу міцності на стиск оброблюваної сталі. Це вказує на існування резервів зниження інтенсивності тертя в зоні різання, а, відповідно, параметрів сигової напруженості різання.

Ключові слова: точіння, сила різання, різальний інструмент, площина зсуву, тертя, міцність.

V. I. POLYANSKY

TECHNOLOGICAL REGULARITIES OF REDUCED ENERGY CAPACITY IN THE MECHANICAL TREATMENT OF MACHINE DETAILS

A new theoretical approach to the separate determination of the components of the cutting force during turning due to the processes of "clean" cutting and friction on the front and rear surfaces of the cutting tool in the total intensity of machining using the experimental data of the tangential and radial components of the cutting force and the conditional shear angle of the material being processed is proposed. This made it possible to align the theory and practice of the cutting process, clarify the theoretical solutions for which the conditional shear angle of the material being processed is determined using the formula by Professor K. A. Zvorykin, and on this basis establish the conditions for reducing energy intensity and cutting force. It is shown that when turning with hexanit-R cutters on a detail from steel 45, the energy intensity of "clean" cutting significantly exceeds the compressive strength of the steel being worked. This indicates the existence of reserves to reduce the intensity of friction in the re-zone, and, accordingly, the parameters of the power cutting intensity.

Key words: turning, cutting force, cutting tool, shear plane, friction, strength.

Введение. Методы обработки материалов резанием из всех известных методов формообразования поверхностей деталей машин являются наименее энергоемкими, обеспечивающими высокие показатели качества, точности и производительности обработки, получившие широкое применение в производстве. Наименьшей энергоемкостью обладают *методы обработки материалов резанием лезвийными инструментами*. Резание абразивными инструментами характеризуется большей энергоемкостью, хотя и применяется в основном на финишных технологических операциях, где окончательно формируются параметры качества и точности обрабатываемых поверхностей. Поэтому важным направлением повышения эффективности операций финишной обработки следует рассматривать применение вместо процессов шлифования абразивными кругами процессов резания современными лезвийными инструментами с износостойкими покрытиями, а также изготовленными из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ), которые характеризуются относительно низкой интенсивностью трения с обрабатываемым материалом и соответственно низкой энергоемкостью обработки. Данная работа посвящена определению условий снижения энергоемкости и силы резания при лезвийной механической обработке.

Анализ последних исследований. Вопросам снижения энергоемкости и силы резания в научно-технической литературе постоянно уделяется большое внимание [1 – 3]. В настоящее время накоплен значительный практический опыт в этом направлении. Разработаны эффективные технологические процессы резания современными сборными лезвийными твердосплавными и керамическими инструментами с износостойкими покрытиями зарубежного производства, позволяющими уменьшить силы и температуру резания, повысить качество и производительность обработки. Благодаря применению этих инструментов появилась возможность реализовать условия высокопроизводительного высокоскоростного резания, обеспечивающего высокие показате-

тели качества обрабатываемых поверхностей. Это открывает широкие возможности эффективного применения данных инструментов на ряде финишных операциях взамен процессов шлифования. Однако в настоящее время отсутствуют математические зависимости, позволяющие отдельно учесть энергии резания и трения на задней и передней поверхностях лезвийного инструмента в общем энергетическом балансе процесса механической обработки. В результате это ограничивает возможности дальнейшего поиска путей снижения энергоемкости и повышения качества и производительности обработки, что требует разработки новых математических моделей определения параметров силовой напряженности механической обработки.

Постановка задачи. В настоящей работе необходимо установить аналитические зависимости основных параметров силовой напряженности механической обработки и на их основе количественно определить доли энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки. Это позволит аналитически описать энергоемкость обработки, составляющие силы резания, обусловленные собственно резанием и трением на задней и передней поверхностях лезвийного инструмента в процессе обработки, и условия по их уменьшению, что открывает новые возможности выбора оптимальных параметров режима резания и характеристик режущего инструмента.

Математическая модель. В работе [4] установлена аналитическая зависимость для определения энергоемкости (условного напряжения резания σ) при механической обработке с учетом лишь процесса резания:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сжс}}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сжс}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

Очевидно, чем больше угол β , тем меньше условное напряжение резания σ . При условии $\beta \rightarrow 45^\circ$ имеет место $\sigma \rightarrow \sigma_{сжс}$. Данная зависимость справедлива для лезвийной обработки. Так, при отсутствии трения образующейся стружки с передней поверхностью резца при точении угол $\beta = 45^\circ$, а $\sigma = \sigma_{сжс}$ (как и при растяжении или сжатии прямолинейного образца).

В реальных условиях процесса точения присутствует трение образующейся стружки с передней поверхностью резца – его доля в общем энергетическом балансе процесса обработки равна $\alpha_{тр} = (\sigma - \sigma_{сжс}) / \sigma$. Тогда с учетом зависимости (1), имеем $\alpha_{тр} = 1 - \operatorname{tg} \beta$. Соответственно, доля собственно резания составляет $\alpha_{рез} = 1 - \alpha_{тр} = \operatorname{tg} \beta$. При условии $\beta \rightarrow 45^\circ$ справедливо: $\alpha_{тр} \rightarrow 0$, а $\alpha_{рез} \rightarrow 1$ (что соответствует 100 %).

Зависимость (1) получена без учета трения на задней поверхности резца, которое, как установлено экспериментально, оказывает существенное влияние на силовую и, соответственно, тепловую напряженности процесса резания. Поэтому важно аналитически установить зависимости, увязывающие параметры силовой напряженности процесса резания с интенсивностью трения одновременно на задней и передней поверхностях резца, поскольку в научно-технической литературе данные зависимости отсутствуют. Для этого следует обратиться к расчетной схеме процесса стружкообразования при резании металлов, предложенной профессором К. А. Зворыкиным [1] еще в конце 19 века, но не утратившей своей значимости и в настоящее время, так как расчеты условного угла сдвига обрабатываемого материала β , по-прежнему, производятся по его формуле:

$$\beta = 45^\circ + \frac{\gamma - \psi}{2}, \quad (2)$$

где γ – положительный передний угол режущего инструмента; ψ – условный угол трения сходящей стружки с передней поверхностью инструмента.

Однако, как показывает практика, при этом имеет место значительное расхождение расчетных и экспериментальных значений угла β – расчетные значения всегда больше экспериментальных. Поэтому с целью дальнейшего совершенствования формулы (2) в настоящей работе разработана математическая модель определения параметров силовой напряженности процесса резания с учетом аналитической зависимости для установления условного угла сдвига обрабатываемого материала β [4, 5]:

$$K_{рез} = \operatorname{tg} 2\beta, \quad (3)$$

где $K_{рез} = P_z / P_y$ – коэффициент резания; P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н.

Если в качестве параметров P_z и P_y рассматривать экспериментальные значения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания, то установлено, что расчетные значения угла β принимают достаточно

большие значения, превышающие экспериментальные данные. Следовательно, коэффициент резания $K_{рез} = P_z / P_y$ должен принимать меньшие значения, определяемые отношением лишь составляющих силы резания, участвующих в формировании процесса стружкообразования при резании, без учета сил, возникающих в процессе трения обрабатываемого материала с задней поверхностью режущего инструмента.

Раздельное определение составляющих силы резания, обусловленных собственно резанием и трением на задней и передней поверхностях лезвийного инструмента в процессе механической обработки. Тангенциальную P_z и радиальную P_y составляющие силы резания следует представить в виде (рис. 1):

$$P_z = P_{z1} + P_{z2} + P_{zmp}; \quad (4)$$

$$P_y = P_{y1} + P_{y2} + P_{ymp}, \quad (5)$$

где P_{z1} , P_{y1} – составляющие силы резания, участвующие в образовании сдвига материала вдоль условной плоскости сдвига O_1A_1 , Н; P_{z2} , P_{y2} – составляющие силы резания, участвующие в образовании сдвига материала вдоль условной плоскости сдвига O_2A_2 , Н; P_{zmp} , P_{ymp} – составляющие силы трения, возникающей в процессе трения обрабатываемого материала с задней поверхностью режущего инструмента, Н.

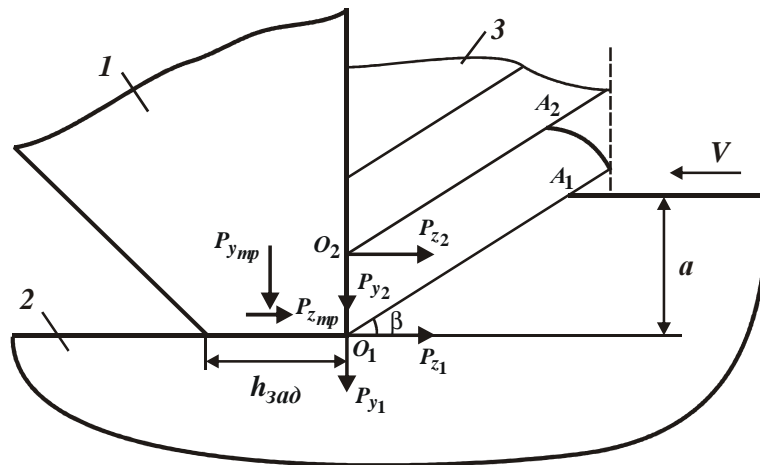


Рис. 1 – Расчетная схема параметров силовой напряженности процесса резания при точении:
1 – резец; 2 – обрабатываемый материал; 3 – образующаяся стружка.

Очевидно, в образовании сдвига материала вдоль условной плоскости сдвига O_1A_1 участвуют составляющие силы резания P_{z1} , P_{y1} , P_{y2} , а составляющая силы резания P_{z2} с физической точки зрения фактически не принимает участия в формировании угла β и поэтому ее можно не учитывать в расчетах. Также в первом приближении можно принять: $P_{z1} = P_{z2}$; $P_{y1} = P_{y2}$. Тогда с учетом зависимости (4) имеем:

$$K_{рез} = \frac{P_{z1}}{2P_{y1}}. \quad (6)$$

Как видно, значения $K_{рез}$ в 2 раза меньше аналогичных значений, рассчитанных по зависимости (3). Зависимость (6) содержит три неизвестные величины: $K_{рез}$, P_{z1} , P_{y1} . Коэффициент резания $K_{рез}$ можно определить по зависимости (3), располагая экспериментальным значением условного угла сдвига обрабатываемого материала β . Для определения составляющих силы резания P_{z1} и P_{y1} следует воспользоваться зависимостями (4) и (5), представляя их в виде:

$$P_z = 2P_{z1} + P_{zmp}; \quad (7)$$

$$P_y = 2P_{y1} + P_{ymp}. \quad (8)$$

С учетом зависимостей (6) и (8), а также $f = P_{zmp} / P_{ymp}$ зависимость (7) преобразуется так:

$$P_z = 4K_{рез} \cdot P_{y1} + f \cdot (P_y - 2P_{y1}), \quad (9)$$

где f – коэффициент трения на задней поверхности инструмента.

Откуда:

$$P_{y1} = \frac{P_z - f \cdot P_y}{2 \cdot (2 \cdot K_{рез} - f)}. \quad (10)$$

Из зависимости (6) можно определить P_{z1} :

$$P_{z1} = 2 \cdot K_{рез} \cdot P_{y1}. \quad (11)$$

Соответственно, из зависимостей (7) и (8) определяются P_{zmp} и P_{ymp} :

$$P_{zmp} = P_z - 2P_{z1}; \quad (12)$$

$$P_{ymp} = P_y - 2P_{y1}. \quad (13)$$

Приведенные зависимости справедливы при главном угле резца в плане $\varphi = 0$. При условии $\varphi > 0$ вместо составляющих силы резания P_y и P_{y1} в зависимостях необходимо рассматривать составляющие силы резания $P_{xy} = P_y / \cos \varphi$ и $P_{xy1} = P_{y1} / \cos \varphi$, образующиеся в плоскости xoy . Тогда

$$P_{xy1} = \frac{P_z - f \cdot P_{xy}}{2 \cdot (2K_{рез} - f)}; \quad (14)$$

$$P_{z1} = 2 \cdot K_{рез} \cdot P_{xy1}; \quad (15)$$

$$P_{zmp} = P_z - 2P_{z1}; \quad (16)$$

$$P_{xymp} = P_{xy} - 2P_{xy1}; \quad (17)$$

$$K_{рез} = \frac{P_{z1}}{2P_{xy1}}. \quad (18)$$

Таким образом, располагая экспериментальными значениями параметров P_z , P_y , f и $K_{рез}$, по зависимостям (14) – (18) можно определить параметры P_{z1} , P_{y1} , P_{zmp} , P_{ymp} и $K_{рез}$.

Результаты расчета параметров силовой напряженности механической обработки. В качестве примера рассмотрим процесс точения резцом из *гексanita*–P (с главным углом резца в плане $\varphi = 45^\circ$) цилиндрической детали из *стали 45* [6]. В табл. 1 приведены экспериментальные значения составляющих силы резания P_z , P_y и P_{xy} для различных длин площадок износа на задней поверхности резца $h_{зад}$ (подача $S = 0,07$ мм/об.; глубина резания $t = 0,2$ мм). Экспериментально установлено, что условный угол сдвига обрабатываемого материала $\beta = 20^\circ$. Тогда с учетом зависимости (3) коэффициент резания $K_{рез} = 0,84$. Коэффициент трения на задней поверхности резца определяется отношением разностей тангенциальных P_z составляющих силы резания (для $h_{зад} = 0,2$ мм и $h_{зад} = 0,1$ мм) и радиальных P_y составляющих силы резания (для тех же пар $h_{зад} = 0,2$ мм и $h_{зад} = 0,1$ мм), табл. 1.

Таблица 1 – Значения параметров силовой напряженности процесса механической обработки

$h_{зад}$, мм	P_z , Н	P_y , Н	P_{xy} , Н	P_{z1} , Н	P_{xy1} , Н	P_{zmp} , Н	P_{xymp} , Н	$\alpha_{рез}$	$\alpha_{мп}$
0,05	110	50	70,7	53,8	32	2,4	6,7	0,49	0,51
0,1	140	100	141			32,4	77	0,38	0,62
0,2	200	220	311			92,4	247	0,27	0,73
0,3	260	340	480			150,4	416	0,2	0,8
0,4	320	460	650			212,4	586	0,165	0,835
0,5	370	580	820			262,4	756	0,145	0,855
0,6	440	720	1018			332,4	954	0,122	0,878

Как следует из табл. 1, эти разности составляющих силы резания остаются неизменными и для пары значений $h_{зад} = 0,3$ мм и $h_{зад} = 0,2$ мм; а так же для $h_{зад} = 0,4$ мм и $h_{зад} = 0,3$ мм; для $h_{зад} = 0,5$ мм и $h_{зад} = 0,4$ мм; для $h_{зад} = 0,6$ мм и $h_{зад} = 0,5$ мм. Следовательно, коэффициент трения не зависит от длин площадок износа на задней поверхности резца $h_{зад}$ и остается постоянной величиной, примерно равной $f = P_{zmp} / P_{xymp} = 0,35$. Иными

словами, отношение приращений составляющих силы резания P_z и P_{xy} с увеличением длины площадки износа на задней поверхности резца $h_{зад}$ остается постоянным, равным 0,35.

Подставляя в зависимости (14) – (17) экспериментальные значения P_z , P_{xy} , f и $K_{рез}$ для $h_{зад} = 0,05$ мм (табл. 1), получаем: $P_{xy1} = 32$ Н; $P_{z1} = 53,8$ Н; $P_{zмп} = 2,4$ Н; $P_{xyмп} = 6,7$ Н.

Из зависимости (6) следует, что коэффициент резания равен

$$K_{рез} = \frac{53,8 \text{ Н}}{2 \cdot 32 \text{ Н}} = 0,84.$$

Соответственно, коэффициент трения на задней поверхности резца составляет

$$f = \frac{2,4 \text{ Н}}{6,7 \text{ Н}} = 0,35,$$

то есть расчеты выполнены правильно. В данном случае сила трения, возникающая на задней поверхности резца, незначительна.

Следовательно, тангенциальная составляющая силы резания P_z обусловлена в основном условиями сдвига обрабатываемого материала вдоль условных плоскостей сдвига O_1A_1 и O_2A_2 . При этом $P_{z1} = P_{z2}$.

Радиальная составляющая силы резания P_y обусловлена в основном условиями трения обрабатываемого материала с передней поверхностью резца. При этом $P_{y1} = P_{y2}$.

Как видно, тангенциальная составляющая силы резания P_z при $h_{зад} = 0,05$ мм примерно в одинаковой степени зависит от условий резания и трения. Для определения коэффициента трения, возникающего на передней поверхности резца, следует воспользоваться аналитической зависимостью [4]:

$$K_{рез} = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma). \quad (19)$$

Очевидно, сравнивая значения коэффициента резания $K_{рез}$, определяемые зависимостями (3) и (19) с учетом равенства $\operatorname{ctg}(\psi - \gamma) = \operatorname{tg}[90^\circ - (\psi - \gamma)]$, приходим к формуле (2) проф. К. А. Зворыкина.

Сравнивая значения $K_{рез}$, определяемые зависимостями (6) и (19), приходим к зависимости:

$$2 \cdot \operatorname{tg} \beta = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma). \quad (20)$$

При значениях $\beta = 20^\circ$ и $\gamma = -11^\circ$ (согласно приведенного выше расчета для точения стали 45 резцами из гексанита-Р), исходя из зависимости (20), условный угол трения сходящей стружки с передней поверхностью инструмента принимает значение $\psi = 21^\circ$, а коэффициент трения $f = \operatorname{tg} \psi = 0,38$. Это соответствует экспериментально установленным значениям коэффициента трения, возникающего на задней поверхности резца ($f = 0,35$). Таким образом, зависимость (20) приводит в соответствие теорию и практику резания материалов.

Если же расчет условного угла трения сходящей стружки с передней поверхностью инструмента ψ произвести по формуле (2) проф. К. А. Зворыкина для $\beta = 20^\circ$ и $\gamma = -11^\circ$, то получим: $\psi = 61^\circ$; $f = \operatorname{tg} \psi = 1,8$. Это не соответствует действительности, поскольку, как известно из курса физики, коэффициент трения $f < 1$, а угол $\psi < 45^\circ$. Этим, собственно, и определяется ограниченность применения формулы (2) проф. К. А. Зворыкина для расчета условного угла сдвига обрабатываемого материала β , поскольку условный угол трения сходящей стружки с передней поверхностью инструмента ψ не должен принимать несуществующие значения, превышающие 45° .

С увеличением $h_{зад} > 0,05$ мм составляющие силы резания P_{z1} и P_{xy1} остаются примерно неизменными, а составляющие силы резания $P_{zмп}$ и $P_{xyмп}$ – увеличиваются, причем, $P_{xyмп}$ – более интенсивно (табл. 1). Поэтому энергия трения в общем энергетическом балансе процесса обработки будет увеличиваться, превышая энергию собственно резания. Так, при $h_{зад} = 0,05$ мм доля энергии резания равна:

$$\alpha_{рез} = \frac{P_{z1}}{P_z} = \frac{53,8 \text{ Н}}{110 \text{ Н}} = 0,49.$$

Соответственно, доля энергии трения равна: $\alpha_{мп} = 1 - \alpha_{рез} = 1 - 0,49 = 0,51$.

Аналогично определяются значения $\alpha_{рез}$ и $\alpha_{мп}$ для других значений $h_{зад}$ (табл. 1). Как видно, чем больше

значение $h_{зад}$, тем больше $\alpha_{тр}$ и меньше $\alpha_{рез}$.

Энергоемкость обработки (условное напряжение резания) определяется зависимостью $\sigma = P_z / S_{срез}$, где $S_{срез} = S \cdot t$ – площадь поперечного сечения среза, мм². Для условий собственно резания:

$$\sigma_{рез} = P_{z1} / S_{срез} = 53,8 \text{ Н} / (0,07 \text{ мм} \cdot 0,2 \text{ мм}) = 3843 \text{ Н} / \text{мм}^2.$$

Как видно, энергоемкость собственно резания в несколько раз превышает предел прочности на сжатие обрабатываемой стали 45 – $\sigma_{сж} \approx 970 \text{ Н} / \text{мм}^2$. Это указывает на существенное влияние условий трения на передней поверхности резца на образование условного угла сдвига обрабатываемого материала β , который для данных условий обработки равен 20°. При условии отсутствия трения на передней поверхности резца (то есть для идеальных условий обработки, соответствующих условиям одноосного сжатия обрабатываемого материала) угол β был бы равен 45°, а $\sigma_{рез} \rightarrow \sigma_{сж}$. Поэтому основным условием уменьшения энергоемкости обработки следует рассматривать снижение интенсивности трения в зоне резания.

Перспективы дальнейших исследований. Автор считает перспективными пути исследования, связанные с определением параметров силовой напряженности процесса резания, раздельным учетом составляющих силы резания, обусловленных процессами собственно резания и трения в общей энергоемкости механической обработки, и на этой основе установление условий уменьшения энергоемкости и силы резания.

Выводы. В работе предложен новый теоретический подход к раздельному определению составляющих силы резания при точении, обусловленных процессами собственно резания и трения на передней и задней поверхностях режущего инструмента в общей энергоемкости механической обработки, с использованием экспериментальных данных тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и условного угла сдвига обрабатываемого материала. Это позволило привести в соответствие теорию и практику процесса резания, уточнить теоретические решения, полученные с использованием формулы проф. К. А. Зворыкина для определения условного угла сдвига обрабатываемого материала, и на этой основе установить условия уменьшения энергоемкости и силы резания. Показано, что при точении резцами из гексанита–Р детали из стали 45 энергоемкость собственно резания значительно превышает предел прочности на сжатие обрабатываемой стали. Это указывает на существование резервов снижения интенсивности трения в зоне резания и, соответственно, уменьшения энергоемкости и других параметров силовой напряженности процесса резания.

Список литературы

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Лолодзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
3. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
4. Новиков Ф. В., Якимов А. В. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. В десяти томах. – Т. 1. «Механика резания материалов». – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
5. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки: монография. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.
6. Новиков Ф. В., Якимов А. В. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. В десяти томах. – Т. 3. «Резание материалов лезвийными инструментами». – Одесса: ОНПУ, 2003. – 546 с.

References (transliterated)

1. Bobrov V. F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 343 p.
2. Loladze T. N. *Prochnost' i iznosostoykost' rezhushhego instrumenta* [Strength and wear resistance of cutting tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 320 p.
3. Silin S. S. *Metod podobiya pri rezanii materialov* [The method of similarity when cutting materials]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 152 p.
4. Novikov F. V., Yakimov A. V. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. V desyati tomakh. Tom. 1. "Mekhanika rezaniya materialov"* [Physical and mathematical theory of material processing and engineering technology. In ten volumes. Vol. 1. «Mechanics of material cutting»]. Odessa, ONPU Publ., 2002. 580 p.
5. Novikov F. V. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki: monografiya* [Fundamentals of Mathematical Modeling of Technological Processes of Mechanical Processing: monograph]. Dnepr, LIRA Publ., 2018. 400 p.
6. Novikov F. V., Yakimov A. V. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya V desyati tomakh. Tom. 3. "Rezaniye materialov lezviynymi instrumentami"* [Physical and mathematical theory of material processing and engineering technology. In ten volumes. Vol. 3. "Cutting materials with blade tools"]. Odessa, ONPU Publ., 2003. 546 p.

Поступила (received) 20.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Полянський Володимир Іванович (Полянский Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich) – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ «Імперія металів», м. Харків; тел.: (067) 578-09-06; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.